桩－土－桩相互作用影响的试验研究

王 涛，刘金砺
（中国建筑科学研究院，北京 100013）

摘 要：通过大比例尺模型试验、工程实测结果与弹性理论解进行对比，指出弹性理论解夸大了桩－桩、桩－土、土－土相互作用影响，造成沉降计算值偏大和过高估计桩顶反力的不均匀性和筏底地基土反力的不均匀性。据此，建议进行上部结构－基础－桩土共同作用的分析计算时，必须充分估计弹性理论解与真实值的差别，以工程实测和试验数据为基础对弹性理论解进行修正，方可获得较满意的计算结果。

关键词：桩－桩；桩－土；土－土；相互作用因子；弹性理论
中图分类号：TU473 文献标识码：A 文章编号：1000－4548(2008)01－0100－06

作者简介：王 涛(1978－)，男，辽宁鞍山人，博士，主要从事桩基工程研究。E-mail: taow715@sina.com。

Tests on influence of pile-soil-pile interaction

WANG Tao, LIU Jin-li
(China Academy of Building Research, Beijing 100013, China)

Abstract: It was pointed out through large scale model tests and a comparison between the measured results and the theoretical solution of elasticity that the theoretical solution of elasticity exaggerated the influence of pile-pile, pile-soil, soil-soil interaction, and it led to the large predicted value of subsidence and overestimated the non-uniformity of the reaction on pile head and non-uniformity of the earth pressure on raft bottom. The difference between the theoretical solution of elasticity and the real value should be estimated in analysis of interaction of superstructure-foundation-soil, and the theorefical solution of elasticity should be revised based on the measured and model test results.

Key words: pile-pile; pile-soil; soil-soil; interaction influence coefficient; elastic theory

0 引 言

目前，桩筏（箱）基础设计中，考虑上部结构、基础和桩土共同作用的分析还在不断探索中，现在普遍采用的有限元等数值计算手段当中，也大多基于弹性理论进行计算。因此，如何能比较准确地计算桩－桩、桩－土、土－土的相互作用因子是关键的一个环节。Poulos 基于弹性理论解，通过大量的试验研究和计算机分析，提供了许多图表受到各国学者的重视。本文通过桩土相互作用影响的试验研究，发现常规弹性理论解过高估计了桩－土－桩的相互影响，这通常会导致以下两个结果：①常规弹性理论解预估的相互作用因子远大于实测相互作用因子，这将导致预估的群桩沉降往往大于实测值；②由常规弹性理论解预估的群桩桩顶反力分布的不均匀性比实侧值要大。群桩模型试验和现场群桩试验的结果表明，实测的群桩桩顶反力分布的总模式与常规弹性理论的分析一致，即两者都得到角桩反力最大、边桩反力次之和中心桩反力最小的总趋势，但实测的群桩反力分布的不均匀度要比理论计算的小。

笔者认为导致上述现象的根本原因是：土体碎散介质的非连续性以及土的应力变形的弹塑性造成的。

为改进共同作用分析计算、提高其可靠性，进行了桩－土－桩相互作用影响的试验研究。

1 相互作用因子的表述及应用

1.1 利用两桩的相互作用因子计算群桩沉降

Poulos 应用 Mindlin 解提出桩－桩相互作用因子的定义为[1]

$$\alpha_{ij}=\frac{\text{由}j\text{桩上单位荷载对}i\text{桩所引起的沉降}}{\text{由}i\text{桩上单位荷载对自身引起的沉降}}=\frac{\delta_{ij}}{\delta_{ii}}\text{。} \quad (1)$$

Poulos 等通过用 Mindlin 位移解来计算桩之间的相互因子，利用叠加原理，把两根桩的相互因子应用于计算群桩沉降，也即相互作用因子法。

由 n 根桩组成的群桩基础，其中 i 桩的沉降为

$$s_i=\delta_{ii}\sum_{j=1}^{n}\alpha_{ij}Q_j \quad \text{。} \quad (2)$$

收稿日期：2007－02－07

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

式中　两桩相互作用因子 α_{ij} 根据 Mindlin 解求得，按桩的长径比 L/d 、距径比 S_a/d 、桩土刚度比 K（$K=E_p/E_s$）、土层厚度比 h/L 及均匀无限厚土层的 α_{ij} 理论值列成表[1]；Q_j 为 j 桩桩顶荷载；δ_{ii} 为 i 桩受单位荷载时的桩顶沉降即柔度系数，根据静载试验结果取工作荷载 Q_a 下沉降 S_a，按 $\delta_{ii}=S_a/Q_a$ 确定。对于相同条件的桩 δ_{ii} 相等。工程应用时，可根据式（2）和总荷载 P 与各桩反力平衡条件 $P=\sum Q_j$，并利用刚性承台受轴心荷载时，$S=S_i$；柔性承台受轴心荷载时，$Q_j=P/n$，各为 $n+1$ 个方程求得 $n+1$ 个未知量。

上述相互作用因子法，对于成层土中的大面积群桩基础的沉降计算，显然不适用。更为重要的问题是要考虑按弹性理论计算的桩的相互因子值与实际不符所带来的影响。故应对相互作用因子予以修正[1]。Poulos 在 GeoShanghai 2006 会议上提出了这一问题。

1.2　关于共同作用计算分析中桩土刚度矩阵

考虑上部结构－基础－地基（桩土）共同作用计算的基本方程为

$$([K]_{st}+[K]_F+[K]_{s(p,s)})\{u\}=\{F\}_{st}+\{F\}_F \quad (3)$$

式中，地基或桩土刚度矩阵 $[K]_{s(p,s)}$ 系由 Mindlin 解求得的柔度系数矩阵求逆而得，即

$$[K]_{s(p,s)}=[\Delta]^{-1} \quad (4)$$

式中　$[\Delta]$ 为地基或桩土（对于桩基）柔度矩阵，其中包含 4 个元素：①桩－桩相互影响柔度系数 $\delta_{pp,ij}$，为桩 j 受单位荷载时引起桩 i 桩顶的沉降，当 $i=j$，即桩 i 自身受单位荷载引起桩顶的沉降 $\delta_{pp,ii}$（即前述 δ_{ii}）；②桩－土相互影响柔度系数 $\delta_{ps,ij}$，桩 j 受单位荷载时引起土结点 i 处的沉降；③土－桩相互影响柔度系数 $\delta_{sp,ij}$，为土结点 j 相应面积 $\overline{A_j}$ 上作用均布荷载 $P_j=1/\overline{A_j}$ 时引起桩 i 桩顶的沉降，由互等定理，可得 $\delta_{sp,ij}=\delta_{ps,ij}$；④土－土相互影响柔度系数 $\delta_{ss,ij}$ 为土结点 j 相应面积 $\overline{A_j}$ 上作用均布荷载 $P_j=1/\overline{A_j}$ 时引起土结点 i 处的沉降。由式（1）可知，上述相互影响柔度系数 δ_{ij} 与相互作用因子 α_{ij} 之间的关系为

$$\left.\begin{aligned}\delta_{pp,ij}&=\delta_{pp,ii}\alpha_{pp,ij},\\ \delta_{ps,ij}&=\delta_{ps,ii}\alpha_{ps,ij},\\ \delta_{sp,ij}&=\delta_{sp,ii}\alpha_{sp,ij},\\ \delta_{ss,ij}&=\delta_{ss,ii}\alpha_{ss,ij}。\end{aligned}\right\} \quad (5)$$

通过试验研究桩土相互作用性状时，通常可由单桩、平板加载试验对桩、土沉降测试得到桩土相互作用因子。由于 $S_{ij}/S_{ii}=\delta_{ij}/\delta_{ii}$，故可由荷载 Q 作用下的沉降量之比得到单位荷载下沉降量（柔度）之比。因此，桩－桩相互作用因子：

$$\alpha_{pp,ij}=\frac{\delta_{pp,ij}}{\delta_{pp,ii}} \quad ； \quad (6)$$

桩－土相互作用因子：

$$\alpha_{ps,ij}=\frac{\delta_{ps,ij}}{\delta_{ps,ii}} \quad ； \quad (7)$$

土－桩相互作用因子：

$$\alpha_{sp,ij}=\frac{\delta_{sp,ij}}{\delta_{sp,ii}} \quad ； \quad (8)$$

土－土相互作用因子：

$$\alpha_{ss,ij}=\frac{\delta_{ss,ij}}{\delta_{ss,ii}}。 \quad (9)$$

由式（5）可知，桩－土－桩相互影响柔度系数的变化规律与桩土相互作用因子（由于相互作用因子由式（5）两边分别除以 $\delta_{pp,ii}$，$\delta_{ps,ii}$，$\delta_{sp,ii}$，$\delta_{ss,ii}$ 得到）的变化规律是相同的。因此，可通过试验实测相互作用因子来评估弹性理论计算结果，据此对桩土刚度矩阵进行修正。

2　土－土相互作用因子试验研究及分析

为了测定土－土相互作用影响，在载荷试验平板（长×宽×高=0.707 m×0.707 m×0.15 m）一侧距板边 150，300，450，600，750，900，1050，1200 mm 布置地表浅层标点，测定各点的沉降及土－土相互作用影响范围[2]。布置情况如图 1 所示。

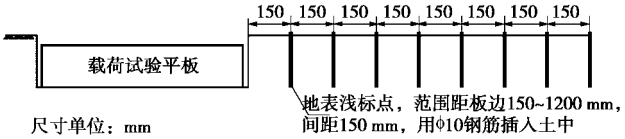


图 1　土－土相互作用影响试验示意

Fig. 1 Tests on influence of soil-soil interaction

距压板边 150～1200 mm 处地表的沉降影响如图 2 所示。从图 2 可以看出，周边地表土沉降影响范围随着与板边距离的增大而减小，在不同荷载水平下，减小的趋势大体相同。当板顶为地基土特征值相应的荷载时，板顶的沉降为 6.04 mm，距板边 150～1050 mm（1200 mm 处百分表飘值过大，故剔除）的沉降依次为 1.0，0.53，0.33，0.1，0.05，0.03，0.02 mm，距板边 1050 mm 处沉降值不及板顶沉降的 1%。

将板侧各点沉降除以板顶沉降则可以得到相应的“土－土相互作用因子 $\alpha_{ss,ij}$”，如图 3 所示。

从图 3 可以看出：虽然周边地表沉降的影响范围随板顶的荷载水平增加而加大，但土－土相互作用因子随板顶的荷载水平提高而减小，这说明板底及周围地基土存在塑性区，弱化了土－土相互作用影响。在与土的承载力特征值相应的板顶荷载 50 kN 下，距板边 150～1050 mm 处土－土相互作用因子依次为

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

0.166，0.088，0.055，0.016，0.008，0.004，0.002；而与土的承载力极限值相应的板顶荷载 100 kN 下，距板边 150～1050 mm 处土－土相互作用因子依次为 0.094，0.047，0.030，0.013，0.007，0.003，0.002；从上面可以看出，本次试验得到的土－土影响范围比较小，仅局限在板边 1.5 倍板宽的范围内。

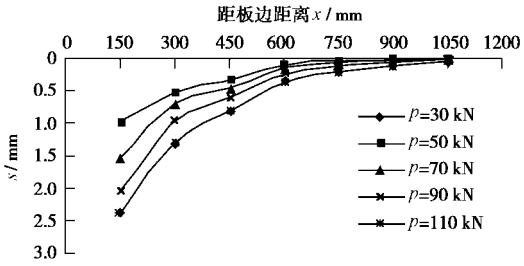


图 2 承压平板沉降影响水平范围

Fig. 2 Influence of settlement produced by loading plate

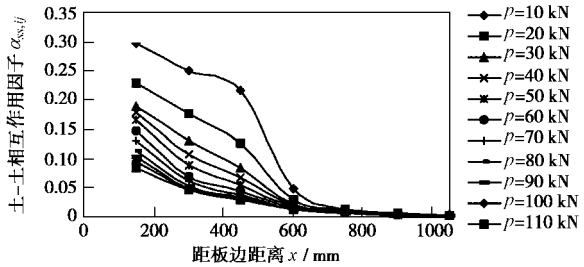


图 3 土－土相互作用因子与板边距离的关系

Fig. 3 Relationship between soil-soil factor and distance

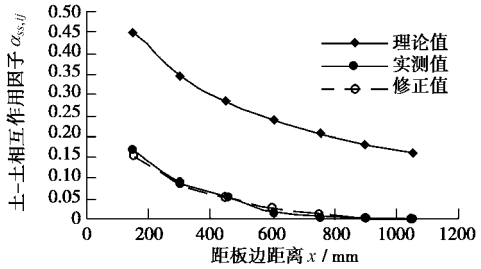


图 4 土－土相互作用因子理论值与实测值对比

Fig. 4 Comparison between theoretical value and test value of soil-soil interaction factor

从图 4 中可以看出，理论值与实测值的大体趋势基本是一致的。参照刘金砺经过大量不同土质中的实测结果在文献[3]中提出的修正模型，回归分析出土－土相互作因子修正模型如下：

$$\zeta_i = 0.45 \ln \frac{D_e}{S_a} \quad , \tag{10}$$

式中，S_a 为土表面结点间距，D_e 为有效最大影响距离，由表 1 确定。

表 1 D_e 值

Table 1 Value of D_e

压缩模量 E_s/MPa	≤4	10	20	≥30
影响范围 D_e/m	4d	6d	8d	10d

3 桩－土相互作用因子试验研究及分析

为了测出桩－土的相互作用因子，采用模型桩（桩长 4.5 m、桩径 150 mm）进行加载，在距桩中心轴线 1～8 d 范围内埋设沉降标点如图 5 所示[2]。

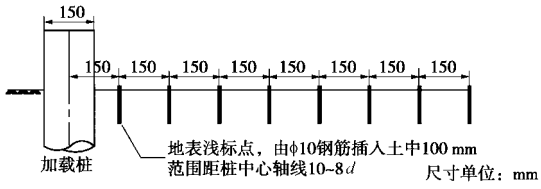


图 5 桩－土相互影响模型试验示意

Fig. 5 Tests on influence of pile-soil interaction

图 6 为桩周地表土沉降随桩顶荷载水平变化的关系。从图中可以看出：单桩受荷对桩周地表沉降的影响随着与桩中心间距的增大而快速衰减，在不同荷载水平下，衰减的趋势基本一致。极限荷载下，在 6d 处绝对沉降不及 0.5 mm。当桩顶荷载加至承载力特征值 R_a 时，桩顶沉降为 7.49 mm，距试桩 1d～5d 处的各点的沉降量依次为：1.46，0.89，0.56，0.41，0.18 mm，5d 处的沉降不及桩顶沉降的 3%。

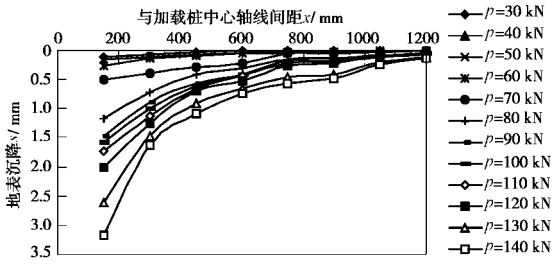


图 6 P-1 桩对桩周土地表沉降影响

Fig. 6 The influence of settlement of ground surface produced by load of pile P-1

如果将各点受桩影响产生的沉降除以相应荷载水平下的桩顶荷载与各点相应荷载水平下载荷平板沉降除以相应板顶荷载的相对值表示，也即 $\alpha_{ps,ij} = \delta_{ps,ij} / \delta_{ps,ii}$，则 $\alpha_{ps,ij}$ 为桩－土相互作用因子。如图 7，从图中可以看出桩－土相互作用因子随着距桩中心距增大和荷载水平提高而衰减，衰减的趋势大体一致。当桩顶荷载加至承载力特征值 R_a 时，距试桩 1d～8d 处的地表处的桩－土相互作用因子依次为：0.058，0.045，0.034，0.020，0.010，0.008，0.002，0.001，可以明显地看出，当距桩中心轴线 5d 时，桩－土相互影响已衰减至 0.010，说明桩－土影响已经很弱。

4 桩－桩相互作用因子试验研究及分析

试验分别对 P-1 类型双桩（长径比 $L/d=30$）、

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

P-2 类型双桩（长径比 $L/d=15$）、P-1 与 P-2 混合型长短双桩通过变换桩距 $S_a=2d$～$6d$ 进行桩－桩相互影响若干组平行试验[2]，试验加载示意见图 8。

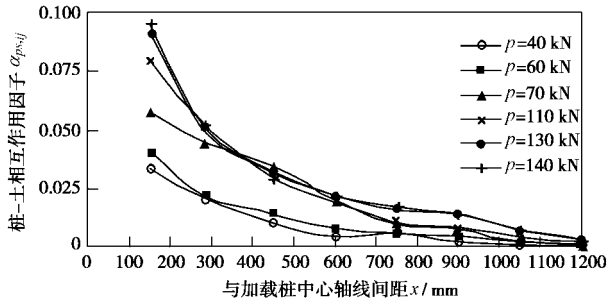


图 7 桩－土相互作用因子与荷载水平关系

Fig. 7 The relationship between pile-soil interaction factor and load level

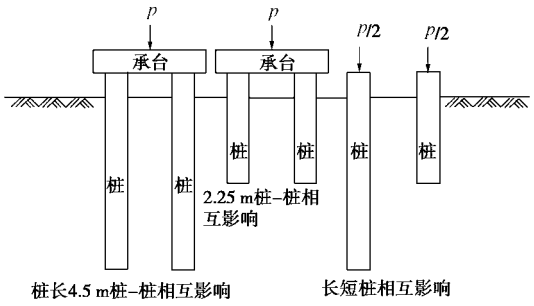


图 8 桩－桩相互影响试验示意

Fig. 8 Tests on influence of pile-pile interaction

对于等长度双桩相互影响试验通过承台将双桩联系起来，承台底面与土表面分离，在承台中心点处加二倍于相应双桩荷载值；而对于长短桩相互影响考虑偏心因素，无法将二者统一，所以采用对长短桩同时加载。此外，本次试验也考虑了“遮帘和加筋效应”对双桩相互因子的影响，做了 $S_a=2d$～$4d$ 的两桩中间加筋的相互影响试验，但其结果离散，未能采用。本文试图缩小在理论研究与实践之间已产生的某些差距。

根据单桩、双桩试验所得荷载－沉降曲线可求得实际的相互因子。承台厚度 150 mm，可认为是刚性承台，此刚性承台下双桩的沉降由双桩相互作用因子定义可表示为 $S=\delta_{11}(\alpha_{11}Q_1+\alpha_{21}Q_2)$。由于 $\alpha_{11}=1$，$Q_1=Q_2=P/2$，故 $S=\dfrac{\delta_{11}P}{2}(1+\alpha_{21})$。实测相互作用因子为

$$\alpha_{12}=\alpha_{21}=\frac{2S_a}{\delta_{11}P_a}-1 \quad 。 \tag{11}$$

式中　P_a 为双桩基础工作荷载，$P_a=P_u/2$；S_a 为荷载 P_a 下的沉降；δ_{11} 为单桩允许承载力状态下单位荷载下的沉降，$\delta_{11}=S_a/Q_a$。

本次试验 P-1 型双桩、P-2 型双桩、P-1 与 P-2 混合型长短桩相互作用因子试验结果与 Poulos 弹性理论相互作用因子对比见图 9～11。根据本次若干组平行试验中桩－桩相互作用因子实测值与理论值之间的关系，借鉴文献[3]中提出的修正模型，回归分析出桩－桩相互作用因子修正模型如式 (12)。修正后的弹性理论相互作用因子可见图 9，10。

$$\left.\begin{aligned}\zeta_i&=0.47\ln\frac{D_e}{S_a},\\ D_e&=D_1+\frac{L}{2}\tan\frac{\varphi}{4}。\end{aligned}\right\} \tag{12}$$

式中　S_a 为桩与土表面结点间距；L 为桩长；φ 为桩长范围内土内摩擦角加权平均值；D_1 为按桩长范围内土的压缩模量 E_s 加权平均值由表 2 确定。

表 2 D_1 值

Table 2 Value of D_1

压缩模量 E_s/MPa	≤4	10	20	≥30
影响范围 D_1 /m	6d	8d	10d	12d

注：d 为桩直径；可根据 E_s 值内插求 D_1。

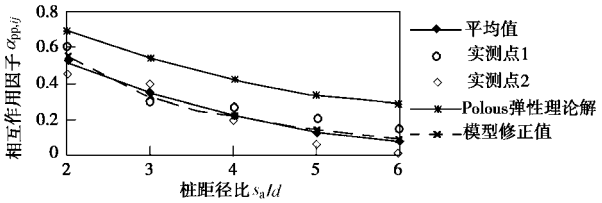


图 9 P-1 型双桩相互作用因子随桩距径比变化

Fig. 9 The relationship between interaction factor for double piles of type P-1 and ratio of spacing/diameter

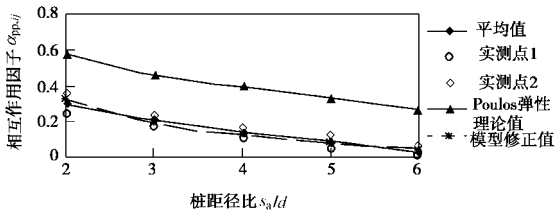


图 10 P-2 型双桩相互作用因子随桩距径比变化

Fig. 10 The relationship between interaction factor for double piles of type P-2 and ratio of distance/diameter

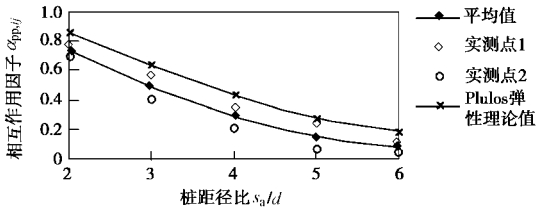


图 11 P-1、P-2 长短桩相互作用因子随桩距径比变化

Fig. 11 The relationship between interaction factor for double piles of type P-1 and P-2 and ratio of spacing/diameter distance/diameter

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

5 土－桩相互因子试验研究及分析

为了测出土－桩的相互因子，采用在距加载平板边缘不同距离（板边缘距桩中心轴线 1d～8d）处设置模型桩（桩长 4.5 m/2.25 m、桩径 150 mm）来测定土－桩相互作用因子，但实测结果未能测出和真实地反映出土－桩的相互作用因子，故本文分析中，根据互等定理以桩－土相互作用因子代替土－桩相互作用因子，即 $\alpha_{sp,ij}=\alpha_{ps,ij}$。

6 工程实测桩筏基础中基桩桩顶反力

图 12，13 所示为武汉某大厦桩箱基础桩、土反力实测结果。该大厦为 22 层框剪结构，基桩为 φ500PHC 管桩，L=22 m，均匀布桩，桩距 3.3d，桩数 344 根，箱底面积 42.7 m×24.7 m，箱底土层为粉质粘土，桩端持力层为粗中砂。由图 12 看出，桩顶反力在底板自重作用下呈近似均匀分布，随结构刚度与荷载增加，外缘之增幅大于内部，最终发展为中、边桩反力为 1∶1.7。图 13 所示桩间土反力发展为中、边部反力比 1∶1.4。两者均呈马鞍形分布。以上反力的不均匀性远远小于弹性理论解。

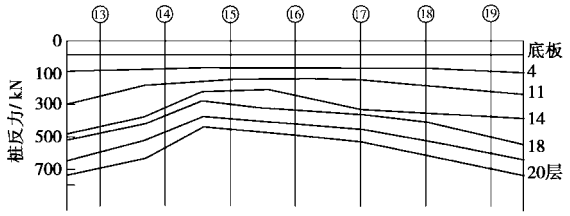


图 12 武汉某大厦桩箱基础桩反力测试结果

Fig. 12 Test results of reaction on pile box foundation piles of a building in Wuhan

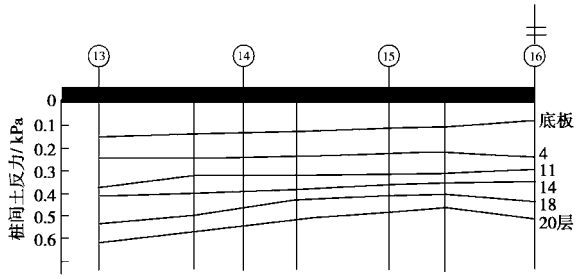


图 13 武汉某大厦桩箱基础土反力测试结果

Fig. 13 Test results of earth reaction on pile box foundation of a building in Wuhan

文献[3]中给出不同结构刚度建筑物桩基桩顶荷载实测值（Q_{av} 为平均值）与弹性理论值比较如下：角桩 Q_c/Q_{av} 实测为 1.32～1.50，理论为 2.10～3.00；边桩 Q_b/Q_{av} 实测为 1.05～1.42，理论为 1.15～1.50；内部桩 Q_i/Q_{av} 实测为 0.40～0.86，理论为 0.05～0.35。

7 桩筏基础中基桩桩顶反力的模型试验测试结果

7.1 框筒结构的模型试验实测结果

如图 14 所示为在粉质粘土地基上 20 层框筒结构 1/10 现场模型试验示意[4]。从中看出，等桩长布桩（d=150 mm，L=2 m），尽管其最大沉降、差异沉降差异明显,在荷载（F=3250 kN）下，最大沉降量 S_{max}=6 mm，最大差异沉降量△S_{max}=0.0012L（L_0 为二测点距离），但是其桩顶反力如表 3 所示，远未达到按弹性理论计算的结果。

表 3 桩顶反力比(F=3250 kN)

Table 3 Ratio of reaction force on top of piles

试验项目	内部桩 P_i/P_{av}	边桩 P_e/P_{av}	角桩 P_c/P_{av}
等长度布桩试验	0.756	1.404	1.151

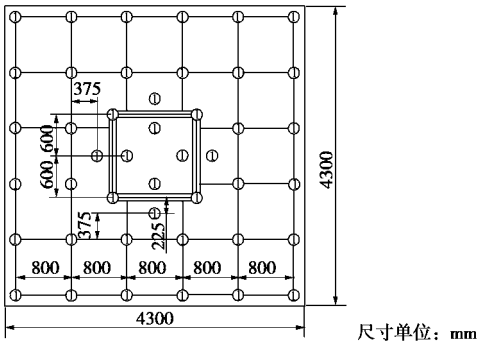


图 14 等长度桩基模型试验

Fig. 14 Model tests on pile foundation with equal pile lengths

7.2 低承台群桩（桩数 n=3²）的模型试验实测结果

中国建筑科学研究院地基所与黄河水利委员会在位于济南洛口的黄河南岸堤侧进行了大规模系列钻孔单桩与群桩试验[5]。该处地面以下 8 m 深为粉土，3.5～4 m 以上属稍湿、稍密，以下至 8 m 为湿、中密。8 m 以下为流塑、软塑轻亚粘土。地下水位约在 8 m 左右。桩的施工采用干法作业，大锅锥钻成孔。下面就桩数为 9，桩径为 d=250 mm，L/d=18，以及距径比分别为 3 和 6 的两组低承台群桩的桩顶荷载分配比随荷载水平变化与弹性理论计算值对比结果如图 15 所示。

对于打入或压入式挤土桩，由于土的强度变形性状在沉桩过程中受到干扰，群桩中各桩荷载的分配在其它条件相同的条件下将随沉桩顺序而异；对于地基土均匀性基本不受施工干扰的钻孔桩，群桩中各桩的荷载分配主要取决于土的特性和承台、桩、土间相互作用的影响。

从图 15 我们可以看出，对于桩距 3 d 群桩，实测各桩荷载相差不大，总趋势是中心桩略小，角、边桩略大；而按弹性理论分析结果，中心桩承受平均荷载的 18%；角桩承受平均荷载的 148%。这主要是由于

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

在桩距为 3*d* 时，中心桩的侧摩阻力因桩、土的相互作用而明显提高，补偿了一部分由于桩的相邻影响而降低的承载力，从而使桩顶荷载分配差异减小。而当桩距为 6*d* 时，实测各桩的荷载分担比差异较大，中心桩只分担 40%～55%的荷载，与弹性理论分析结果大体相近；但角、边桩实测的荷载分担比差异较理论值小。这说明在大桩距条件下基本不显示桩、土相互作用的增强效应，因而其桩顶荷载分配与弹性理论解接近；从试验结果我们还可以看出在较小荷载下和群桩达到极限荷载后出现桩顶荷载的重分配；在达到极限荷载后，无论桩距大小，中心桩荷载都趋于增大，这种现象说明：不同位置的桩其摩阻力的发挥不是同步的，角桩由于桩土间（桩与桩群外围土）的相对位移比中心桩大，侧摩阻的发挥先于中心桩，因而出现随着荷载增大，中心桩的荷载增大，而角桩分担的荷载相对减小的现象 对于桩距 3*d* 的群桩则由于桩土相互作用的增强效应最终出现中心桩荷载超过角边桩的现象。

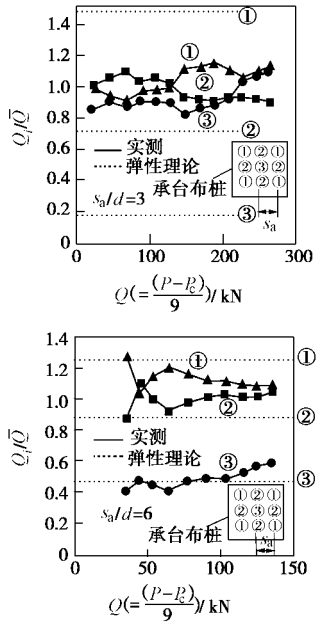


图 15 群桩桩顶荷载分配比 $Q_i/\overline{Q}$ 随桩距、荷载的变化及其与弹性理论分析对比

Fig. 15 The variation of load ratio on top of the pile group with spacing and load and its comparison with the theoretical analysis of elasticity

8 结　　论

本文通过大比尺的模型试验和工程实测结果与弹性理论解对比，中等压缩性黏性土中实测工作荷载下桩周地表土变形影响范围为自桩中心轴线起 6*d* 范围内，远小于弹性理论解的影响范围。随荷载水平的提高，桩周地表土的沉降量和范围均加大，但桩－土相互因子却降低。加载平板周围地表变形影响范围为 1.5 倍加载板边长，远小于布氏解。这是由于土体系非理想弹性、非连续介质，所以按连续介质弹性理论计算桩－土－桩相互作用影响会导致偏大的结果，沉降值也偏大，同时也会过高地估计桩顶反力的不均匀性。笔者认为只有通过大量试验和工程实测总结分析出其变化特征和规律，对弹性理论解在不同类别和性质的土中进行修正，使其接近真实情况。本次试验桩－桩、桩－土、土－土相互作用因子仅代表某一类土内的有限次平行试验的结果，但能反映出桩－土－桩相互影响的基本规律。对于不同类别土应进行更多试验了解其变化。但桩、土相互作用影响范围小于连续介质弹性理论结果是肯定的，这也是导致理论分析所得沉降偏大的原因。此外，此次试验相互作用因子未能考虑桩端、桩侧土的分担荷载比例、桩端及桩侧土支承刚度、下卧层土层等因素的影响。所以，运用弹性理论或有限元等数值方法进行共同作用分析时，尚应依靠岩土工作者的经验和大量测试结果分析，对弹性理论桩－土－桩相互影响进行修正，以不断提高共同计算分析的可靠性。

参考文献：

[1] POULOS H G, DAVIS E H. Pile foundation analysis and design[M]. New York: Wiley, 1980.

[2] 王　涛. 带裙房高层建筑桩基优化设计与桩土相互作用因子试验研究[D]. 北京：中国建筑科学研究院，2007. (WANG Tao. Experimental study on pile foundation optimum design of hise-rise buildings with podium and pile soil interaction influencc coefficient[D]. Beijing: China Academy of Building Research, 2007. (in Chinese))

[3] 刘金砺. 桩土变形计算模型和变刚度调平设计[J]. 岩土工程学报, 2000, **22**(2): 151－157. (LIU Jin-li. The modified model of pile-soil deformation calculation and variable rigidity design method for balance settlement[J]. China Journal of Geotechnical Engineering, 2000, **22**(2): 151－157. (in Chinese))

[4] 张　武. 高层建筑桩筏基础模型试验研究[D]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2002. (ZHANG Wu. Study on piled raft foundation by model tests[D]. Beijing: China Academy of Building Research, 2002. (in Chinese))

[5] 刘金砺，袁振隆，张国平. 钻孔群桩工作机理与承载能力的研究[R]. 北京：中国建筑科学研究院，1983: 23－26. (LIU Jin-li, YUAN Zhen-long, ZHANG Guo-ping. The study on work mechanism and bearing capacity of bored group piles[R]. Beijing: China Academy of Building Research, 1983: 23－26. (in Chinese))

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net